

Porteur(s) : C. Garrido Alzar (SYRTE)

Partenaire(s) : J. Reichel (LKB), S. Schwartz (TRT)

Résumé du projet en Français :

Le spin squeezing est une forme particulière d'intrication à plusieurs corps qui réduit les fluctuations d'une mesure en-dessous de la limite en $N^{-1/2}$, conduisant à une amélioration de la stabilité en fréquence de l'horloge. Le spin squeezing sur des atomes neutres a été obtenu soit par interaction atome-rayonnement soit par interaction atome-atome. Les méthodes existantes peuvent être réparties en trois familles :

- Squeezing par mesures non-destructives
- Squeezing par interactions inter-atomiques
- Squeezing par interactions entre atomes et cavité optique

À ce jour, la méthode la plus puissante pour l'application aux horloges semble être le queezing par interaction atome-cavité, parce qu'elle est bien adaptée à l'utilisation d'atomes thermiques ultra-froids qui, contrairement aux BEC, ont montré de long temps de cohérence.

L'objectif de ce projet est de faire du spin squeezing un instrument métrologique à l'état de l'art. L'horloge à atomes piégés sur puce, qui utilise la transition hyperfine du ^{87}Rb , sera utilisée comme démonstrateur. La première génération d'horloges traditionnelles est arrivée à maturité (stabilité de $5,8 \cdot 10^{-13}$ à 1s).

En utilisant le spin squeezing, nous avons pour objectif de pousser la performance en-dessous du niveau de stabilité à 10^{-13} . Une deuxième génération du dispositif va être construite en incorporant une cavité à fibre optique miniature sur puce, qui sera fabriquée par usinage automatique des facettes en bout de fibre optique. Une nouvelle puce à atomes sera fabriquée pour accueillir cette cavité. En utilisant le squeezing atome-cavité, nous allons évaluer l'amélioration ultime de la stabilité de l'horloge. Nous allons travailler sur les décalages systématiques en fréquence liés à l'utilisation du spin squeezing. Sur le long terme, les résultats pourraient être transférés sur les autres horloges atomiques et capteurs atomiques qui sont en construction au SYRTE et à Thales TRT.

Un débouché du projet pourra inclure un transfert de technologie à un partenaire industriel :Thales TRT va évaluer les performances obtenues par le state-squeezing de l'horloge atomique et évaluera l'intérêt potentiel de cette technologie en regard des applications pratiques dans les domaines du chronométrage et des capteurs inertiels. Thales TRT va aussi se pencher sur les problématiques technologiques liées au développement industriel.

Abstract in English:

Spin squeezing is a specific form of many-body entanglement which reduces the fluctuations in a clock measurement below the $N^{-1/2}$ limit, leading to an improvement of the clock frequency stability. Spin squeezing of neutral atoms has been achieved by either atom-light interaction or atom-atom interaction. The existing methods can be placed into three classes:

- Squeezing through quantum non-demolition
- Squeezing through interactions between atoms
- Squeezing through interaction between atoms and an optical cavity

To date, squeezing through atom-cavity interaction seems the most powerful for clock applications because it is well adapted to the use of ultra-cold thermal atoms, which, in contrast to BEC, have shown very long coherence times.

The objective of this project is to implement spin squeezing in state-of-the-art a metrology instrument. The trapped atom clock on a chip operating on the ^{87}Rb hyperfine transition will be used as test-bed. The first generation "traditional" clock set-up was brought to maturity ($5.8 \cdot 10^{-13}$ stability at 1s).

Using spin squeezing we aim to push the performance below 10^{-13} stability. A second generation set-up will be built incorporating an on-chip miniature optical fibre cavity which will be fabricated through laser machining of the end facets of optical fibre. A new atom chip will be fabricated to accommodate for the cavity. Using atom-cavity squeezing we will evaluate the ultimately improvement of the clock stability. We will investigate systematic

frequency shifts related to the use of spin squeezing. In the long-term the results could be transferred to other atomic clocks and atomic sensors, which are under construction at SYRTE and Thales TRT.

In view of follow-up projects which could include technology transfer to an industrial partner, Thales TRT will evaluate the performances achieved by the squeezed-state atomic clock, and assess the potential interest of this technology regarding the practical applications in the fields of time keeping and inertial sensing. Thales TRT will also comment on the technologic issues related to industrial development.

Résultats marquants :

Réduction spontanée de bruit atomique via les interactions caractérisée par un paramètre de compression $\xi^2 \leq -1.3 \pm 0.3$ dB,

Highlights:

Spontaneous interaction mediated spin noise squeezing of -2.2 dB compared to the standard quantum limit, that provides a metrologically useful spin squeezing $\xi^2 = -1.3$ dB.

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

Creating Spin Squeezing in a Compact Atomic Clock, T. Laudat, K. Ott, M. Huang, V. Dugrain, A. Sinatra, P. Rosenbusch, C. Garrido Alzar, and J. Reichel. Research in Optical Sciences, OSA Technical Digest, doi.org/10.1364/QIM.2017.QF2A.2 (2017)

Oral communications:

"Spontaneous spin squeezing in a trapped atom clock on a chip", C. L. Garrido Alzar. Workshop on miniaturised atomic clocks Ross Priory, Loch Lomond 6-7th November 2017.

Posters:

T. Laudat, V. Dugrain, C. L. Garrido Alzar, J. Reichel and P. Rosenbusch, "Toward self spin-squeezing in a BEC clock", 25th International Conference on Atomic Physics, ICAP 2016, 24 – 29 juillet 2016, Seoul, Korea.

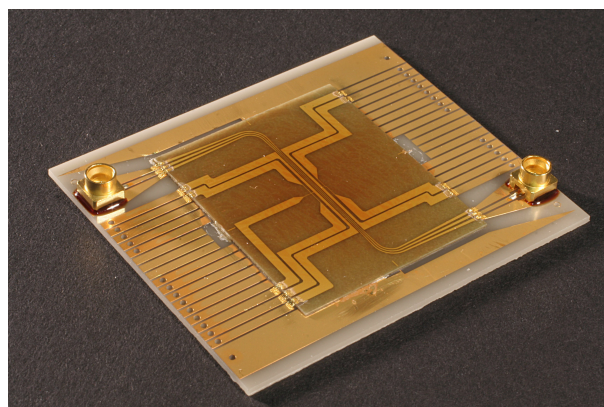
T. Laudat, V. Dugrain, C. L. Garrido Alzar, J. Reichel and P. Rosenbusch, "Toward self spin-squeezing in a BEC clock", European Frequency and Time Forum, EFTF2016, 4-7 avril 2016, York, England.

T. Laudat, K. Ott, M. Huang, V. Dugrain, A. Sinatra, P. Rosenbusch, C. Garrido Alzar and J. Reichel, "Creating Spin Squeezing in a Compact Atomic Clock", Quantum Information and Measurement (QIM) - IV: Quantum Technologies, Université Pierre et Marie Curie, Paris (France), 5 – 7 avril 2017.

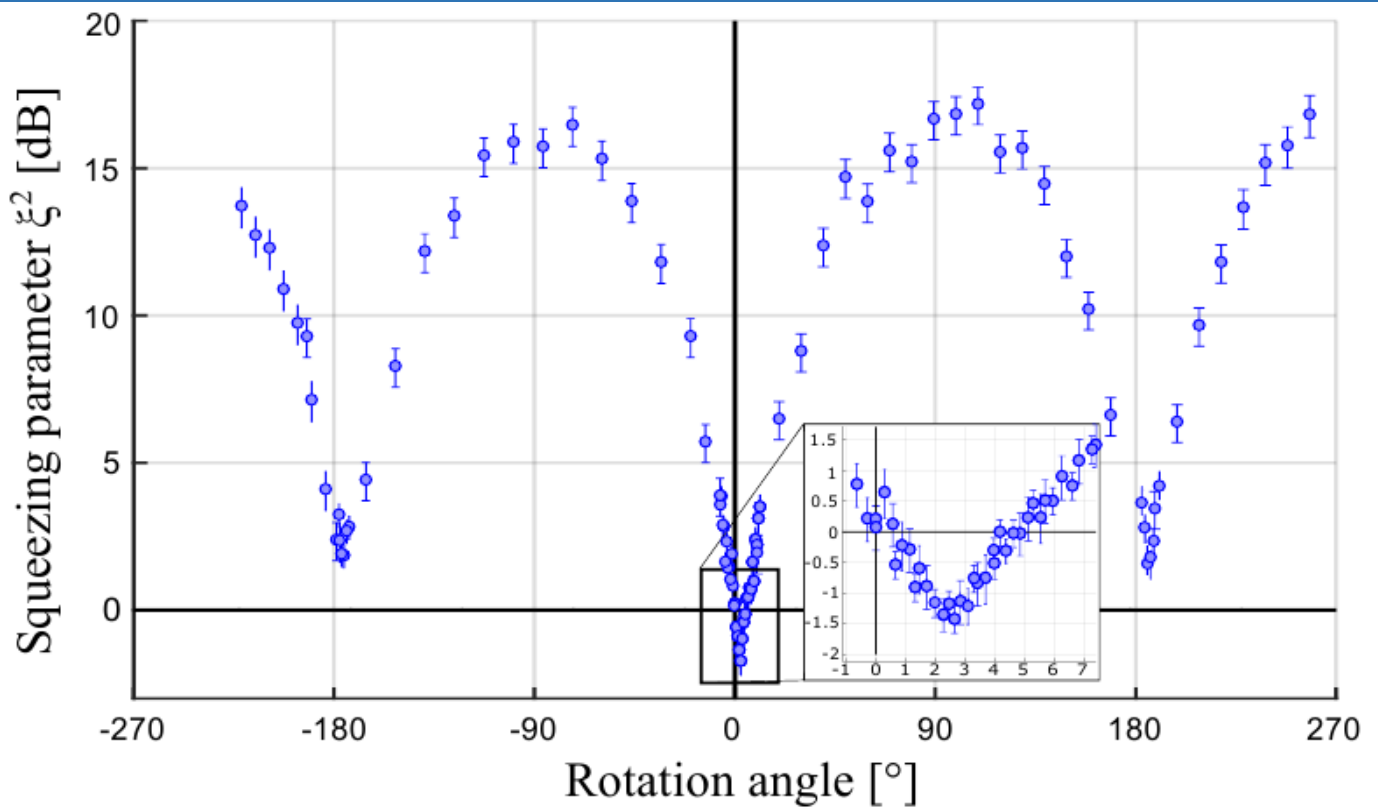
Thesis:

"Spontaneous spin squeezing in a spinor Bose-Einstein condensate trapped on an atom chip". Théo Laudat, octobre 2017

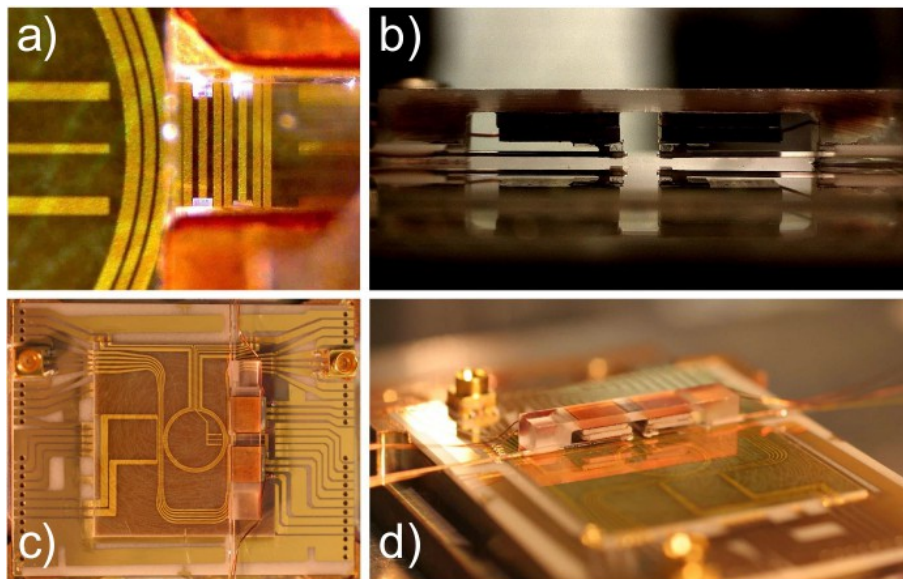
Pictures with captions (curve, photo, scheme ...):



First generation atom chip used for the observation of the spontaneous spin squeezing.



Spin noise tomography. $10\log(\xi^2)$ is plotted as a function of the rotation angle ϑ .
 A minimum spin noise $\xi^2 = -1.3 \pm 0.4$ dB is observed for $\vartheta_{\min} = 2.5^\circ$.



New atom chip and cavities assembly. Cavity mount glued to chip.

a) shows the two resonators above the science chip wires. The view is slightly blurred by the quartz bridge.

b) side view on the bridge where the reflection in the mirror coating is visible.

c) top view of whole ensemble

d) perspective view of the ensemble.